

工业自动化仪表系列丛书

过程控制系统 和应用

主编 俞金寿
编写人 蒋爱平 刘爱伦



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



工业自动化仪表系列丛书

过程控制系统和应用

主 编 俞金寿
编写人 蒋爱平 刘爱伦

机 械 工 业 出 版 社

本书是工业自动化仪表系列丛书之一。书中全面地介绍了当代过程控制系统的发展和基本概念,过程数学模型建立基本方法,控制器的控制规律,单回路控制系统中被控变量和操纵变量、检测变送器、控制阀、控制器控制规律等的选择,复杂控制系统中常用的串级、比值、均匀、前馈、选择性、分程及采用阀位控制器等。最后还详细地介绍了各种先进的控制系统,以推动先进控制系统的应用。

本书可作为工业过程自动化及仪表专业的工程技术人员、大专院校师生的参考书,也可作为相关专业部门的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统和应用/俞金寿主编. —北京:机械工业出版社, 2003. 6

(工业自动化仪表系列丛书)

ISBN 7-111-12063-9

I. 过... II. 俞... III. 过程控制—自动控制系统
IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第030256号

策划编辑:周娟、张沪光

责任编辑:周娟、张沪光 版式设计:张世琴

责任校对:李秋荣 封面设计:姚毅 责任印制:路琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003年6月第1版·第1次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·8.625印张·230千字

0 001—4 000册

定价:17.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

“工业自动化仪表系列丛书”

编辑委员会

主任委员	张继培		
副主任委员	史美纪（常务）	吴钦炜	
	王璐璐	罗命钧	秦起佑
	周 娟	张沪光	张永江
委 员	薛生虎	杜水友	梁国伟
	蔡武昌	高克成	于世南
	陈晓竹	李铁桥	周有海
	吴 哈	彭 瑜	张雪申
	俞金寿	汪克成	缪学勤
	刘建侯	徐建平	

编写说明

工业自动化仪表是国民经济各部门重要的现代技术装备之一，广泛用于冶金、电力、石油、化工、轻工、纺织、交通、建筑、食品、医药、农业、环保以及日常生活等各个领域。

工业自动化仪表是对物质世界的信息进行自动测量与控制的基础手段和设备，是信息产业的源头和组成部分。

为了认真总结国内外工业自动化仪表的先进经验，提高我国工业自动化仪表的科技、生产、应用水平，经中国仪器仪表学会、上海工业自动化仪表研究所、机械工业信息研究院和中国仪器仪表学会过程检测控制仪表分会共同研究，决定组织编写、出版“工业自动化仪表系列丛书”。

目前，首先陆续出版以下 12 种：《温度测量技术及仪表》、《压力测量技术及仪表》、《流量测量技术及仪表》、《物位测量技术及仪表》、《机械量测量技术及仪表》、《物性分析技术及仪表》、《显示调节技术及仪表》、《可编程序控制器及其应用》、《控制阀选型和应用》（原名执行器）、《过程控制系统和应用》、《仪表可靠性工程和环境适应性技术》、《仪表本安防爆技术》。

本系列丛书内容完整，系列齐全，基本上反映了工业自动化仪表技术与产品的全貌，文字力求深入浅出，通俗易懂。系列丛书既可作为从事工业自动化仪表专业的工程技术人员及广大用户的参考书籍，也可作为大专院校教材及科研、设计、制造、使用单位工程技术人员培训教材。

编写出版“工业自动化仪表系列丛书”，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

“工业自动化仪表系列丛书”编辑委员会

前 言

本书为“工业自动化仪表系列丛书”之一。

随着现代科技进步,各类生产工艺技术不断改进提高,生产过程连续化、大型化不断强化,随着对过程内在规律的进一步了解,以及自动化仪表、计算机的迅猛发展,出现了大量先进的自动化成套设备及装置,例如集散控制系统(DCS)、可编程序控制器(PLC)、现场总线(FB)等,生产过程控制由常规仪表控制向计算机控制发展,常规PID控制向先进控制(APC)、优化控制发展,生产过程自动化水平从局部自动化向综合自动化迅速发展。为了适应这一发展要求,特编写本书。

本书第1章主要叙述过程控制系统的发展以及过程控制系统基本概念。第2章介绍了过程数学模型建立基本方法。第3章控制器的控制规律,介绍了连续和离散比例积分微分控制算法。第4章讨论了单回路控制系统中被控变量和操纵变量选择、检测变送器选择、控制阀选择、控制器控制规律选择、控制器的参数整定及控制系统的投运等。第5章介绍了常用串级、比值、均匀、前馈、选择性、分程及采用阀位控制器等复杂控制系统。第6章就基于模型的预测控制、推断控制、软测量技术、双重控制、纯滞后补偿控制系统、解耦控制系统、自适应控制系统、专家系统、模糊控制、神经网络控制等先进控制系统作一些介绍,以推动先进控制系统的应用。

本书由华东理工大学俞金寿教授主编,并编写了第1章、第2章、第6章同时审阅了全书,蒋爱平副教授编写了第3章、第4章,刘爱伦副教授编写了第5章。

本书主要供国民经济各部门中从事工业过程自动化的工程技术人员阅读,也可供相关专业教学和其他有关人员参考。

由于作者水平所限，书中难免存在不足和缺点，恳请读者批评指正。

作者于 2002 年 12 月

目 录

编写说明

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 控制理论的发展状况	1
1.2 自动控制系统	6
1.2.1 闭环控制与开环控制	8
1.2.2 自动控制系统的组成及框图	10
1.2.3 自动控制系统的分类	12
1.3 自动控制系统的过渡过程及品质指标	16
1.3.1 静态与动态	16
1.3.2 自动控制系统的过渡过程	17
1.3.3 自动控制系统的品质指标	17
第 2 章 过程特性和建模	23
2.1 稳态数学模型的建立	23
2.1.1 机理建模	23
2.1.2 经验模型	26
2.1.3 机理模型与经验模型的组合	28
2.2 过程动态数学模型	29
2.2.1 机理模型	35
2.2.2 过程辨识与参数估计	38
第 3 章 控制器的控制规律	55
3.1 双位控制	55
3.2 比例控制	59
3.3 比例积分控制	64
3.3.1 积分控制	64
3.3.2 比例积分控制的计算	66
3.3.3 积分饱和	69

3.4 比例微分控制	70
3.4.1 理想微分控制	70
3.4.2 实际微分控制	71
3.4.3 比例微分控制的计算	73
3.5 比例积分微分控制	75
3.6 离散比例积分微分控制	77
第4章 单回路控制系统	81
4.1 简单控制系统的组成	81
4.2 被控变量和操纵变量选择	85
4.2.1 被控变量的选择	85
4.2.2 操纵变量的选择	87
4.3 检测变送器选择	97
4.3.1 仪表精度等级和量程的选择	98
4.3.2 动态测量误差对控制质量的影响	98
4.3.3 克服测量变送环节滞后影响的办法	103
4.3.4 测量信号的处理	105
4.4 控制阀的选择	106
4.4.1 控制阀结构形式的选择	107
4.4.2 控制阀口径大小的选择	107
4.4.3 控制阀作用方式的选择	109
4.4.4 流量特性的选择	110
4.4.5 阀门定位器的选择	114
4.5 控制器控制规律选择	116
4.5.1 根据控制规律特点选择	117
4.5.2 根据被控变量选择	118
4.6 控制器的参数整定	122
4.6.1 经验整定法	124
4.6.2 临界比例度法	125
4.6.3 衰减曲线法	126
4.6.4 反应曲线法	128
4.6.5 自整定法	130
4.7 控制系统的投运	135
第5章 复杂控制系统及其应用	139

5.1 串级控制系统	139
5.1.1 串级控制系统的基本原理和结构	139
5.1.2 串级控制系统的特点	142
5.1.3 串级控制系统的设计	149
5.1.4 串级控制系统控制器参数的整定	150
5.1.5 串级控制系统的应用实例	151
5.2 比值控制系统	153
5.2.1 比值控制系统的基本原理和结构	153
5.2.2 比值系数的计算	155
5.2.3 比值控制系统应用实例	157
5.3 均匀控制系统	159
5.3.1 均匀控制系统的基本原理和结构	159
5.3.2 均匀控制系统控制规律的选择及参数整定	162
5.4 前馈控制系统	163
5.4.1 前馈控制系统的基本原理	163
5.4.2 前馈控制的主要结构形式	165
5.4.3 前馈控制系统的设计及工程实施中若干问题	167
5.4.4 前馈控制系统的应用实例	170
5.5 选择性控制系统	174
5.5.1 选择性控制系统的基本原理和结构	174
5.5.2 选择性控制系统的设计	178
5.5.3 选择性控制系统的应用实例	179
5.6 分程控制系统和阀位控制器控制系统	180
5.6.1 分程控制系统	180
5.6.2 采用阀位控制器的控制系统	182
第 6 章 先进控制系统	188
6.1 基于模型的预测控制	189
6.1.1 预测控制的发展	189
6.1.2 预测控制的基本原理和结构	191
6.1.3 预测控制软件包的发展	194
6.1.4 我国预测控制应用	201
6.2 推断控制	203
6.2.1 推断控制系统的基本原理	203

6.2.2 输出可测条件下的推断控制	206
6.3 软测量技术	208
6.3.1 软测量技术的基本原理	209
6.3.2 软测量工程设计	213
6.3.3 软测量技术工业应用实例	215
6.4 双重控制系统	220
6.4.1 双重控制系统的基本原理和结构	220
6.4.2 系统分析	221
6.4.3 系统设计与实施中的一些问题	225
6.5 纯滞后补偿控制系统	227
6.5.1 史密斯预估补偿控制方案	227
6.5.2 自适应史密斯预估补偿控制	231
6.6 解耦控制系统	233
6.6.1 系统的关联分析	233
6.6.2 减少与解除耦合途径	236
6.6.3 串接解耦控制	238
6.7 自适应控制	240
6.7.1 简单自适应控制系统	241
6.7.2 模型参考型自适应控制系统	242
6.7.3 自校正控制系统	245
6.8 智能控制系统	248
6.8.1 智能控制简介	248
6.8.2 专家系统	249
6.8.3 模糊控制	253
6.8.4 神经网络控制	256
参考文献	264

第 1 章 绪 论

1.1 控制理论的发展状况

20 世纪 40 年代开始形成的控制理论被称为“20 世纪上半叶三大伟绩之一”，在人类社会的各个方面有着深远的影响。控制理论与其他任何学科一样，源于社会实践和科学实践。在自动化的发展中，有两个明显的特点：第一，任务的需要、理论的开拓与技术手段的进展三者相互推动，相互促进，显示了一幅交错复杂，但又轮廓分明的画卷，三者间表明出清晰的同步性；第二，自动化技术是一门综合性的技术，控制论更是一门广义的学科，在自动化的各个领域，移植和借鉴起了交流汇合的作用。

自动化技术的前驱，可以追溯到我国古代，如指南车的出现。至于工业上的应用，一般以瓦特的蒸汽机加速器作为正式起点。工业自动化的萌芽是与工业革命同时开始的。这时候的自动化装置是机械式的，而且是自力型的。随着电动、液动和气动这些动力源的应用，电动、液动和气动的控制装置开创了新的控制手段。

到第二次世界大战前后，控制理论有了很大发展。电信事业的发展导致了 Nyquist (1932) 频率域分析技术和稳定判据的产生。Bode (1945) 的进一步研究开发了易于实际应用的 Bode 图。1948 年，Evans 提出了一种易于工程应用的求解闭环特征方程根的简单图解方法——根轨迹分析方法。至此，自动控制技术开始形成一套完整的、以传递函数为基础的、在频率域对单输入单输出 (SISO) 控制系统进行分析与设计的理论，这就是今天所谓的经典控制理论。经典控制理论最辉煌的成果之一要首推 PID 控制规律。PID 控制原理简单，易于实现，对无时间延迟的单回路控制系统极为有效，直到目前为止，在工业过程控制中，有 80%~90% 的系统还使用 PID 控制规律。经典控制理论最主要的特点是，线

性定常对象、单输入单输出、完成镇定任务。即便对这些极简单对象的描述及控制任务，理论上也尚不完整，从而促使了现代控制理论的发展。

20 世纪 60 年代，现代控制理论迅猛发展，这是以状态空间方法为基础，以极小值原理 (Pontryagin, 1962) 和动态规划方法 (Belman, 1963) 等最优控制理论为特征的，而以采用 Kalman 滤波器的随机干扰下的线性二次型系统 (LQG) (Kalman, 1960) 宣告了时域方法的完成。现代控制理论在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果。现代控制理论中，首先得到透彻研究的是多输入多输出系统，其中特别重要的是对描述控制系统本质的基本理论的建立，如可控性、可观性、实现理论、典型型、分解理论等，使控制由一类工程设计方法提高成为一门新的科学。为了扩大现代控制理论的适用范围，相继产生和发展了系统辨识与参数估计、随机控制、自适应控制以及鲁棒控制等各种理论分支，使控制理论的内容愈来愈丰富。现代控制理论虽然在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果，但对于复杂的工业过程却显得无能为力。

从 20 世纪 70 年代开始，为了解决大规模复杂系统的优化与控制问题，现代控制理论和系统理论相结合，逐步发展形成了大系统理论 (Mohammad, 1983)。其核心思想是系统的分解与协调，多级递阶优化与控制 (Mesarovic, 1970) 正是应用大系统理论的典范。实际上，大系统理论仍未突破现代控制理论的基本思想与框架，除了高维线性系统之外，它对其他复杂系统仍然束手无策。对于含有大量不确定性和难于建模的复杂系统，基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、学习控制和基于信息论的智能控制等应运而生，它们在许多领域都得到了广泛的应用。

从控制系统结构来看，已经经历了四个阶段。20 世纪 50 年代是以基地式控制器等组成的控制系统，像自力式温度控制器、就地式液位控制器等，它们的功能往往限于单回路控制，时至今日，这类控制系统仍没有被淘汰，而且还有了新的发展，但所占的比

重大为减少。

20 世纪 60 年代出现单元组合仪表组成的控制系统，单元组合仪表有电动和气动两大类，已延续 30 多年，目前国内还广泛应用。由单元组合仪表组成的控制系统，控制策略主要是 PID 控制和常用的复杂控制系统（例如串级、均匀、比值、前馈、分程和选择性控制等）。

20 世纪 70 年代出现了计算机控制系统，最初是直接数字控制（DDC）实现集中控制，代替常规控制仪表。由于集中控制的固有缺陷，未能普及及推广就被集散控制系统（DCS）所替代。DCS 在硬件上将控制回路分散化，使数据显示、实时监督等功能集中化，有利于安全平稳生产。就控制策略而言，DCS 仍以简单 PID 控制为主，再加上一些复杂控制算法，并没有充分发挥计算机的功能和控制水平。

20 世纪 80 年代以后出现两级优化控制，在 DCS 的基础上实现先进控制和优化控制。在硬件上采用上位机和 DCS 或电动单元组合仪表相结合，构成两级计算机优化控制。随着计算机及网络技术的发展，DCS 出现了开放式系统，实现多层次计算机网络构成的管控一体化系统（CIPS）。同时，以现场总线为标准，实现以微处理器为基础的现场仪表与控制系统之间进行全数字化、双向和多站通信的现场总线网络控制系统（FCS）。它将对控制系统结构带来革命性的变革，开辟控制系统的新纪元。

当前过程控制系统发展的一些主要特点如下。

1. 生产装置实施先进控制成为发展主流

早期的简单控制，由于受到经典控制理论和常规仪表的限制，难以处理工业过程中存在的耦合性、非线性和时变性等。尽管在 20 世纪 70 年代以后，许多生产装置采用了 DCS，但由于当时的理论和技术原因，控制水平仍停留在单回路 PID 控制、联锁保护控制等。随着企业提出的高柔性、高效益的要求，上述控制方案已经不能适应，以多变量预测控制为代表的先进控制策略的提出和成功应用以后，先进控制受到了过程工业界的普遍关注。先进过

程控制 (Advanced Process Control, APC) 是指一类在动态环境中, 基于模型、借助充分计算能力, 为工厂获得最大利润而实施的运行和技术策略。这种新的控制策略实施后, 系统运行在最佳工况, 实现所谓“卡边生产”。据资料报道, 一个投资 163 万美元的乙烯装置实施先进控制后, 预期每年可获得效益 600 万美元。目前, 国内许多大企业纷纷投资, 在装置自动化系统中实施先进控制。国外许多控制软件公司和 DCS 生产商都在竞相开发先进控制和优化控制的商品化工程软件包, 西方国家有一定规模的先进控制软件公司大约有 45 家, 推出 APC 软件 312 种, 全世界应用 APC 的项目有数千项, APC 软件应用年增长率达到 30% 左右。先进控制策略主要有多变量预测控制、自适应控制、推理控制、软测量技术、鲁棒控制、专家控制、模糊推理和神经网络等智能控制, 尤其智能控制已成为开发和应用的热点。

2. 过程优化受到普遍关注

在过程控制中, 过程优化已受到了普遍的关注。在连续过程工业中, 往往上游装置的部分产品是下游装置的原料, 整个生产过程存在装置间的物流分配、物料平衡和能量平衡等一系列问题。借助过程优化, 可使得整个生产过程获得很大的经济效益和社会效益。在过程优化中, 主要寻找最佳的工艺参数设定值, 以获得最大的经济效益, 这称之为稳态优化。稳态优化采用静态模型, 进行离线或在线优化计算。离线优化是指利用各种建模优化方法在约束条件下, 求解最优的工艺参数, 提供操作指导。在线优化是周期性完成模型计算、模型修正和参数寻优, 并将参数值直接送到控制器作为设定值。为获得稳态最优, 要求系统工作在一种特定的、保守程度较小的工况之下, 但一旦偏离了这种工况, 各项指标会明显变差, 操作难度增加, 有时会导致生产的不安全。随着稳态优化的深入研究, 直接影响过程动态品质的最优动态控制也显示出其重要性。

生产过程的优化是在各种操作条件下, 求取目标函数的最优值, 通常是复杂的非线性优化问题。应用传统优化理论往往遇到

困难。在过程优化中,由于系统的复杂性,求全局最优值十分困难,而且实际过程并不一定要求最优值,而只要求得到“优化区域”或“满意解”就可以满足要求。在过程优化中,有许多是受工艺限制的。最近有人提出把工艺设计与控制整体考虑,在工艺设计的同时,考虑到控制的实施方案及效果,就可以在工艺设计阶段消除那些可能导致控制困难的因素,这种方法正在受到人们的关注。

3. 传统的 DCS 在走向国际统一标准的开放式系统

自 1975 年第一套分布式工业控制计算机系统诞生以来,历经近 20 年,各家 DCS 生产厂家的产品大多不能兼容,随着综合自动化的潮流和计算机科学与技术的发展,一些主要的 DCS 生产商经过激烈的竞争,最后终于联手共同推出一种国际标准的现场总线(FIELDBUS)控制系统,它被公认为具有时代特点的新一代分布式计算机控制系统,它的主要特点如下。

1) 开放性 现场总线采用同一种国际标准的通信协议,不同厂家的产品可方便地互联,可与局域网相连。

2) 智能化现场仪表 除了一般现场控制、检测仪表功能以外,还具有诊断、自补偿、现场组态、现场校验。

3) 现场仪表采用数字信号传输 提高传输可靠性,节约传输线的投资。

4) 彻底的分散性 简单控制回路基本分散在现场实现,关键数字信号进中央控制室,中央控制室主要完成信息管理、先进控制和优化。

4. 综合自动化系统(CIPS)是发展方向

过程工业自动化在 20 世纪 90 年代以前仍是自动化孤岛模式。进入 20 世纪 90 年代后,国内外许多企业在国际市场激烈竞争的刺激下,特别是过程工业还受到环境保护的巨大社会压力。节能降耗、少投入多产出的高效生产和减少污染的清洁生产成为企业的生产模式,企业把提高综合自动化水平作为挖潜增效、提高竞争能力的重要途径。集常规控制、先进控制、过程优化、生产

调度、企业管理、经营决策等功能于一体的综合自动化成了当前自动化发展的趋势。综合自动化就是在计算机通信网络和分布式数据库的支持下,实现信息与功能的集成,进而充分调动人的因素的经营系统、技术系统及组织系统(Humanware)的集成,最终形成一个能适应生产环境不确定性和市场需求多变性的全局优化的高质量、高效益、高柔性的智能生产系统,这就是 CIM 思想在连续工业中的体现。

1.2 自动控制系统

生产过程中,对各个工艺过程的物理量(或称工艺变量),有着一定的控制要求。有些工艺变量直接表征生产过程,对产品的数量和质量起着决定性的作用。例如,精馏塔的塔顶或塔釜温度,一般在操作压力不变的情况下,必须保持一定,才能得到合格的产品;加热炉出口温度的波动不能超出允许范围,否则将影响后一工段的效果;化学反应器的反应温度必须保持平稳,才能使效率达到指标。有些工艺变量虽然不直接地影响产品的数量和质量,然而保持其平稳却是使生产获得良好控制的前提。例如,用蒸汽加热反应器或再沸器,在蒸汽总压力波动剧烈的情况下,要把反应温度或塔釜温度控制好是极其困难的;中间贮槽的液位高度与气柜压力,必须维持在允许的范围之内,才能使物料平衡,保持连续的均衡生产。有些工艺变量是决定安全生产的因素,例如锅炉汽包(也称锅筒)的水位、受压容器的压力等,不允许超出规定的限度,否则将威胁生产的安全。还有一些工艺变量直接鉴定产品的质量,例如某些混合气体的组成、溶液的酸碱度等。对于以上各种类型的变量,在生产过程中,都必须加以必要的控制。

图 1-1 为工业生产常见的锅炉汽包示意图,其液位是一个重要的工艺参数。液位过低,影响产汽量,且易烧干而发生事故;液位过高,影响蒸汽质量。因此,对汽包液位应严加控制。

如果一切条件(包括给水流量、蒸汽量等)都近乎恒定不变,